بهینه‌سازی چندهدفهٔ تبدیل یک نیروگاه بخار قدیمی به سیکل ترکیبی با استفاده از بویلرهای بازیاب حرارت تک‌فشاره و دوفشاره به‌وسیلهٔ الگوریتم ژنتیک*

(یادداشت پژوهشی)

صادق نیک‌بخت ناصرآباد[۱]	عبدالله مهرپناهی[۲]	غلامحسن پایگانه[۳]	محمدرضا ارباب تفتی[٤]

چکیده *در تحقیق حاضر باتوجه به اهمیت نیروگاه بخار بندرعباس از لحاظ موقعیت و حجم برق تولیدی، به بررسی انجام بازتوانی کامل بر روی آن پرداخته شده است. روند کار به این صورت است که بعد از انجام مدل‌سازی و انطباق داده‌های مدل‌سازی با سیکل واقعی و راستی‌آزمایی مدل به ارائهٔ نتایج حاصل از مدل‌سازی حالت‌های مورد نظر در انجام بازتوانی پرداخته شده است. بهینه‌سازی با استفاده از توابع راندمان اگزرژی و هزینهٔ برق تولیدی و به‌وسیلهٔ روش الگوریتم ژنتیک انجام پذیرفته است. در نهایت نمودار به‌دست آمده (منحنی پارتو) نمایشی از روند تغییرات هزینه براساس تغییرات راندمان (اگزرژی) را ارائه خواهد داد که در تصمیم‌سازی و انتخاب حالت مد نظر و مطلوب سرمایه‌گذاری مؤثر خواهد بود. نتایج حاصل از بهینه‌سازی دوهدفهٔ بازتوانی نیروگاه بخار با دو بویلر بازیاب حرارت تک‌فشاره و دوفشاره، نشان‌دهندهٔ ارتقای راندمان اگزرژی نیروگاه تا مقداری بالاتر از ٤٦ درصد می‌باشد.*

واژه‌های کلیدی سیکل ترکیبی; نیروگاه بخار; بویلر بازیاب حرارت; هزینهٔ برق تولیدی; راندمان اگزرژی.

Multi Objective Optimization of Converting an Old Steam Power Plant to Combined Cycle Power Plant (CCPP) Using Double and Single Pressure Heat Recovery Steam Generator (HRSG) via Genetic Algorithm

S. Nikbakht Naserabad	A. Mehrpanahi
Gh. Payganeh	M.R. Arbab Tafti

Abstract *In this study, Given the importance of Bandar Abbas steam power plant in terms of Location and its electricity generating, it has been considered for applying the repowering method. After reference cycle modeling and assessing results accuracy, the applied repowering method has been implemented and it's results reported in four main scenarios. Exergy efficiency and electricity generation cost (per kWh) have been considered as objective functions. Based on the six independent variables and four different scenario multi objective optimization has been done. The final reported results can be implemented by the energy managements for making the best decision and choosing the adequate option. Multi objective optimization of proposed combined cycles with single and double pressure heat recovery boilers indicate that the exergy efficiency upgrades up to 46%.*

Key Words Combined Cycle; Steam Power Plant; Heat Recovery Steam Generator (HRSG); Electricity Generation Cost; Exergy efficiency.

---

*تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۲/۱۲ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۱۲/۱۱ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران.

(۲) نویسندهٔ مسئول: دانشجوی دکترا، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران. mehrpanahi@srttu.edu

(۳) دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران.

(٤) استادیار، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران.

مقدمه

هدف کلی از اجرای روش‌های بازتوانی احیای سیستم با استفاده از بازیاب حرارت خروجی از توربین(های) گاز به‌وسیلهٔ بخش بخاری موجود است. یکی از روش‌های متداول بازتوانی، که برای نیروگاه‌های بخار با عمر بالای ۲۵ سال مناسب هستند، بازتوانی کامل گفته می‌شود. هزینهٔ تأسیس چنین نیروگاه‌هایی ۷۰ تا ۸۰ درصد یک نیروگاه سیکل ترکیبی با توان مشابه است که اثر قابل ملاحظه‌ای در مدت زمان بازگشت سرمایه خواهد داشت. در صورت برنامه‌ریزی متولیان بخش تولید انرژی در کشور، روش‌های بازتوانی کامل پتانسیل افزایش توان تا ۱۳ گیگاوات نسبت به حالت موجود را داراست [1].

تحقیق حاضر با در نظر گرفتن امکان تولید تجهیزات بازتوانی در کشور انجام شده است به همین دلیل مبنای تولید مدل، استفاده از تجهیزات داخلی متداول در ساخت نیروگاه‌های سیکل ترکیبی بوده است. تجهیزات اصلی در تبدیل نیروگاه بخار به نیروگاه سیکل ترکیبی بویلر بازیاب حرارت و توربین گاز است. با توجه به توانایی و تجربهٔ ساخت بویلرهای بازیاب تک‌فشاره و دوفشاره در کشور، این نوع از بویلرها برای بازیاب حرارت در نیروگاه بازتوانی‌شده استفاده می‌شود. از مهم‌ترین محدودیت‌های موجود در استفاده از بویلرهای بازیاب حرارت، تأمین فشار لازم در بخش فشار بالای نیروگاه‌های سیکل ترکیبی است که با وجود پیشرفت‌های سال‌های اخیر، امکان تولید بخار با فشار تا ۲۰ مگاپاسکال فراهم شده است [2].

با توجه به تولید توربین‌های گاز صنعتی توان بالای V94.2 در کشور و استفادهٔ گسترده از این توربین‌ها در ایجاد نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، از این توربین‌ها در تولید انرژی ورودی به سیکل بازتوانی استفاده شده است. در نهایت و با انتخاب این تجهیزات، به بهینه‌یابی سیستم بخار الحاقی با توجه به فلسفهٔ کنترلی بهینهٔ قابل دست‌یابی اقدام شده است. به این منظور در نظر داشتن محدودیت‌های سیکل موجود نظیر دبی بخار قابل پذیرش کندانسور و دمای گازهای خروجی از بویلر بازیاب حرارت در فرآیند مدل‌سازی سیکل جدید ضروری به نظر می‌رسد.

در زمینهٔ بازتوانی نیروگاه‌های بخار علی‌رغم اهمیت این روش‌ها مقالات تحقیقی قابل ارجاع اندکی انتشار یافته است. از جمله موارد بررسی شده توسط براندر و همکاران است که موارد کلی در تغییر سیکل-های بخار به سیکل‌های ترکیبی حاصل از اعمال بازتوانی کامل را بیان نموده و نتایج حاصل نشان می-دهد که تعدادی از نیروگاه‌های تحت بررسی به لحاظ اقتصادی قابلیت بازتوانی ندارند [3].

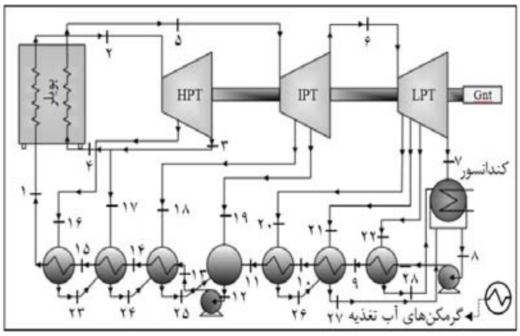
در این تحقیق برای بهینه‌یابی چندهدفه از دو تابع هدف فنی و اقتصادی استفاده شده است. به‌منظور ارائهٔ نتایج ملموس‌تر، با وجود تنوع بالا در ارائهٔ توابع هدف اقتصادی از تابع واحد هزینهٔ برق تولیدی استفاده شده است. تابع هدف راندمان اگزرژی نیز به‌عنوان تابع هدف فنی سیستم انتخاب شده است. این پژوهش با اعمال محدودیت حداکثر هزینهٔ برق تولیدی، راندمان اگزرژی بهینه را در هر حالت برای مقادیر متفاوت هزینهٔ برق تولیدی به‌دست آورده و به‌صورت نمودارهای موسوم به نمودارهای پارتو ارائه نموده است. در انتها با توجه به رابطهٔ رقابتی بین کاهش هزینهٔ برق تولیدی و افزایش راندمان اگزرژی، نقطهٔ کارکرد بهینهٔ فنی- اقتصادی در هر حالت، و مشخصات سیکل بازتوانی در این نقطه مشخص شده است.

باتوجه به اهمیت موضوع تولید برق در کشور، نتایج تحقیق، دستاوردی مفید در راستای برنامه‌های اقتصادی کشور به‌خصوص برنامهٔ پنج سالهٔ پنجم توسعهٔ اقتصادی-اجتماعی و سیاسی کشور می‌باشد، که مطابق این برنامه می‌بایست راندمان تولید برق در

کشور تا پایان سال ۹۳ به ٤۱ درصد برسد [٤] و نیروگاه بخار بندرعباس با راندمان حرارتی ۲۵ درصد (راندمان کنونی)، مشمول این قانون می‌باشد.

معرفی نیروگاه بخار بندرعباس

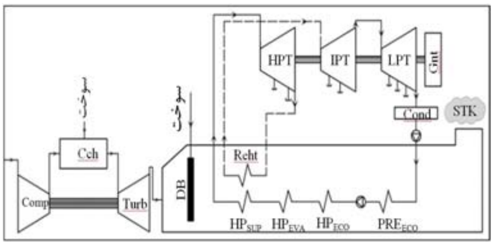
این نیروگاه در کنار دریا احداث شده است و از آب دریا با دمای میانگین ۲۷ درجهٔ سانتی‌گراد برای چگالش بخار استفاده می‌نماید. در حالت طراحی راندمان حرارتی نیروگاه معادل ۳۸/۷ درصد و حداکثر درجهٔ حرارت محیط ٤۸ درجهٔ سانتی‌گراد می‌باشد. مطابق شکل (۱) هر واحد نیروگاه بخار متشکل از بویلر، مجموعهٔ توربین‌های بخار، کندانسور و گرمکن‌های آب تغذیه می‌باشد.



شکل ۱ شماتیک اصلی نیروگاه بخار بندرعباس

بازتوانی نیروگاه بخار

راندمان کنونی نیروگاه بخار بندرعباس ۲۲ تا ۲۵ درصد می‌باشد. همان‌گونه که در بخش مقدمه ذکر شد، از بویلرهای بازیاب حرارت دوفشارهٔ متداول در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی برای مدل‌سازی بازتوانی نیروگاه استفاده شده است. در این پژوهش بازتوانی برای دو ساختار تک‌فشاره و دوفشاره ارائه شده است (شکل ۲ و۳). با در نظر گرفتن چنین روندی، در چهار سناریو و از ۲ تا ۵ توربین گاز در بازتوانی انتخاب و در هر حالت به بهینه‌یابی سیکل پرداخته شده است.



شکل ۲ شکل تغیر ساختار یافتهٔ نیروگاه بخار بندرعباس پس از بازتوانی با بویلر بازیاب حرارت تک‌فشاره

توابع هدف

راندمان اگزرژی. با نادیده گرفتن انرژی هسته‌ای، مغناطیسی، الکتریکی و تأثیرکشش سطحی، در یک سیستم حرارتی، اگزرژی شامل چهار جزء است که به‌شرح زیر می‌باشد [5, 6]:

$$E = E^{PH} + E^{KN} + E^{PT} + E^{CH} \qquad (۱)$$

اجزای تشکیل‌دهندهٔ اگزرژی کل در معادلهٔ بالا به‌ترتیب اگزرژی فیزیکی، اگزرژی جنبشی، اگزرژی پتانسیل و اگزرژی شیمیایی می‌باشند. بنابراین اگزرژی مخصوص یک سیستم از رابطهٔ زیر پیروی می‌نماید:

$$e = e^{PH} + e^{KN} + e^{PT} + e^{CH} \qquad (۲)$$

برای یک فرآیند پایا مقادیر اگزرژی جنبشی و پتانسیل نادیده در نظر گرفته می‌شود [7]. اگزرژی فیزیکی برای بخار به‌صورت زیر تعریف می‌گردد [8].

$$e^{PH} = \left(h - h_0\right) - T_0\left(s - s_0\right) \qquad (۳)$$

به‌طور کلی برای گازها اگزرژی فیزیکی به‌صورت زیر تعریف می‌شود [8]:

$$e^{PH} = C_{p(T)}\left[T - T_0 - T_0 \ln\left(\frac{T}{T_0}\right)\right] + RT_0\left(\frac{p}{p_0}\right) \qquad (٤)$$

اگزرژی شیمیایی گازهای سوخته شده و هوا نسبت به اگزرژی فیزیکی آنها مقادیری قابل صرف‌نظر

را به خود اختصاص می‌دهد، ولی در سوخت‌ها این اگزرژی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد [9].

اگزرژی شیمیایی سوخت‌های هیدروکربنی با فرمول شیمیایی C_aH_b با استفاده از روابط (٦ و ٥) محاسبه می‌گردد [10]:

$$e_f^{CH} = LHV \cdot \gamma_f \qquad (5)$$

$$\gamma_f = 1.033 + 0.0169\frac{b}{a} - \frac{0.0698}{a} \qquad (6)$$

در روابط بالا γ_f به‌عنوان ضریب درجهٔ اگزرژی سوخت و LHV به‌عنوان ارزش حرارتی پایین سوخت تعریف شده است [8, 11]. رابطهٔ (٧) معرف تابع هدف راندمان اگزرژی سیستم می‌باشد.

$$\eta_{ex,RC} = \frac{\sum_i \dot{W}_i}{\sum_i \dot{E}_f} \qquad (7)$$

در این معادله $\dot{E}_f$ اگزرژی سوخت ورودی به نیروگاه است که در برگیرندهٔ سوخت مصرفی محفظهٔ احتراق توربین‌های گاز ($\dot{E}_{f,Cch}$) و داکت‌برنر ($\dot{E}_{f,DB}$) می‌باشد.

$$\sum_i \dot{E}_f = \dot{E}_{f,Cch} + \dot{E}_{f,DB} \qquad (8)$$

توان خالص خروجی از سیکل بازتوانی شده برابر مجموع توان خالص خروجی از توربین(های) گاز ($\dot{W}_{net,GT}$) و توربین بخار ($\dot{W}_{net,ST}$) می‌باشد.

$$\sum_i \dot{W}_i = \dot{W}_{net,GT} + \dot{W}_{net,ST} = \left(N \cdot \dot{m}_{f,Cch} + \dot{m}_{f,DB}\right) \cdot \gamma_f \cdot LHV \qquad (9)$$

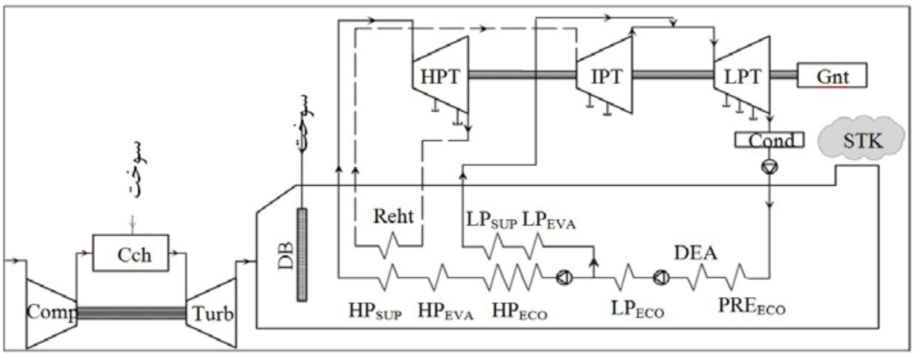
تابع هزینهٔ برق تولیدی

پارامتر هدف در مدل‌سازی اقتصادی هزینهٔ هر کیلووات ساعت برق تولیدی می‌باشد. هزینهٔ هر کیلووات ساعت برق تولیدی نیروگاه به‌صورت تابعی از هزینهٔ سرمایه‌گذاری اولیه برای خرید تجهیزات (Z_c)، هزینهٔ تعمیر و نگهداری (Z_{OM}) و هزینهٔ سوخت (Z_f) به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$Z_E = Z_c + Z_{OM} + Z_f \qquad (10)$$

تجهیزات مورد نیاز شامل توربین گاز، بویلر بازیاب حرارت، داکت برنر و مبدل‌های آب-گاز می‌باشد. هزینهٔ خرید هر کدام از این تجهیزات با واحد دلار در مرجع [12-15] ارائه شده است. قیمت هر کیلووات ساعت برق تولیدی در نهایت با ترکیب روابط به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$Z_E = \left(\frac{TCI.CRF.\varphi}{\dot{W}.H}\right) + C_f.HR_{pp}[\$/Kwh] \qquad (11)$$



شکل ٣ شکل تغییر ساختار یافتهٔ نیروگاه بخار بندرعباس پس از بازتوانی با بویلر بازیاب حرارت دوفشاره

بهینه‌سازی سیکل جدید

در پژوهش حاضر از روش تکاملی الگوریتم ژنتیک برای انجام فرآیند بهینه‌سازی استفاده شده است. این الگوریتم به‌دلیل هم‌گرایی به کمینه‌های عمومی، با وجود عدم دست‌یابی به دقیق‌ترین جواب مسئله، با فاصلهٔ ناچیزی به مقدار بهینهٔ کلی سیستم تحت بررسی همگرا خواهد شد. در انجام بهینه‌سازی شش متغیر مستقل در نظر گرفته شده است که مشخصات این متغیرها در جدول (۱) معرفی شده‌اند.

اعمال برخی محدودیت‌ها نیز در برنامهٔ مدل‌سازی از موارد لازم برای انطباق واقعی‌تر سیکل مدل‌سازی با سیکل واقعی است. دمای خروجی از بویلر بازیاب حرارت از محدودیت‌های موجود در بهینه‌سازی سیکل بازتوانی است، که به‌دلیل جلوگیری از ایجاد نقطه شبنم حداقل این دما برابر با ۱۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است [16]. برخی محدودیت‌های موجود در سیکل بخار به‌عنوان متغیر مستقل مورد توجه قرار گرفته‌اند و محدودهٔ مجاز این متغیرها با توجه به حدود موجود در سیکل بخار تعیین شده است.

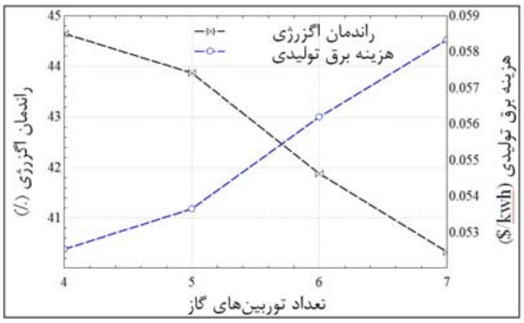
نتایج و تحلیل

در این بخش به‌منظور تحلیل سیکل بهینه‌سازی به تحلیل تأثیر متغیرهای مستقل بر توابع هدف سیستم پرداخته شده است. این متغیرها به‌دلیل اهمیت و نقش تعیین‌کنندهٔ آنها در عملکرد بویلر مورد توجه قرار گرفته‌اند. متغیر اول تعداد توربین‌های گاز مورد استفاده در بازتوانی است. همان‌گونه که از شکل‌های (۵ و ٤) نیز قابل مشاهده است، با افزایش تعداد توربین‌های گاز راندمان اگزرژی سیستم کاهش و هزینهٔ برق تولیدی سیستم افزایش می‌یابد. این حالت به‌دلیل راندمان نسبتاً کم توربین‌های گاز قابل پیش‌بینی است زیرا با افزایش تعداد توربین‌های گاز اثر راندمان آنها در برآیند راندمان کلی سیکل بازتوانی اثر گذاشته و راندمان سیکل کلی کاهش یافته است. احتراق اضافی معمولاً برای بالا بردن پایداری سیستم در تولید توان در شرایط ایجاد تغییرات محیطی در سیکل‌های ترکیبی مورد توجه قرار می‌گیرد. احتراق سوخت اضافی چون در جهت بالا بردن توان تولیدی سیکل ترکیبی نیست، باعث کاهش راندمان کلی سیکل ترکیبی می‌شود. در نمودار شکل-های (۷ و ٦) اثر احتراق اضافی بر راندمان و هزینه برق تولیدی نیروگاه نشان داده شده است. با افزایش دبی سوخت داکت برنر راندمان در حال کاهش و هزینه برق تولیدی سیستم افزایش یافته است. محدودهٔ معرفی‌شده برای سوخت مصرفی داکت برنر باعث کاهش راندمان بیش از ۲ درصد نیروگاه بازتوانی شده است.

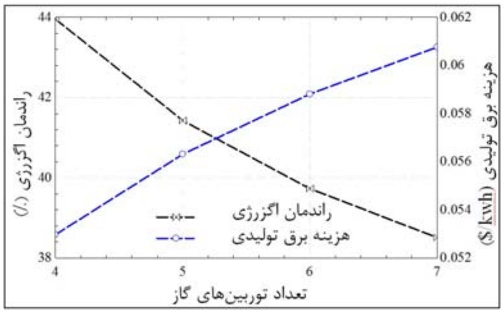
نسبت دبی بخار خروجی از بخش فشار بالا به کل بخار خروجی از بویلر بازیاب حرارت بر میزان جذب حرارت در بویلر، توان کلی سیستم و در نهایت بر راندمان سیکل بازتوانی مؤثر است.

جدول ۱ مشخصات و محدودیت‌های متغیرهای مستقل

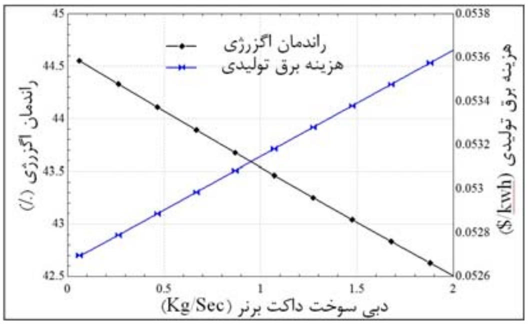
متغیر مستقل	نماد	محدودهٔ بهینه‌یابی	دلیل بازهٔ مورد توجه
دبی خروجی از توربین‌های بخار	L	۰/۳۵ تا ۱/۳۷۳	حداکثر دبی قابل پذیرش کندانسور
نسبت دبی بخار فشار بالا به دبی بخار تولیدی بویلر	y	۰/٦٤ تا ۰/۸۸	حدود دبی مجاز برای تولید در تولید بویلرهای بازیاب داخلی
محدودهٔ دمای پینچ در سطوح فشاری مختلف بویلر	$T_{hp,pinch}, T_{lp,pinch}, T_{pre,pinch}$	۵ تا ۱۵ (oC)	در نظر داشتن راندمان سیستم و سایز مبدل (بحث هزینه)
دبی سوخت داکت برنر (احتراق کمکی)	$\dot{m}_{f,DB}$	۰ تا ۲ (kg.sec-1)	سوختن سطوح حرارتی بویلر



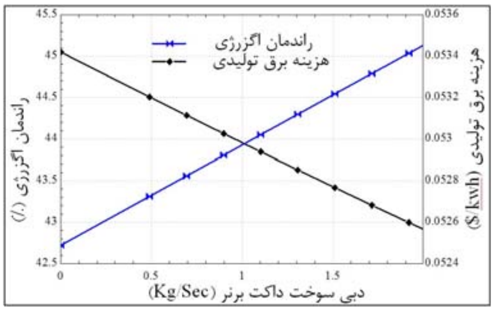
شکل ٤ بررسی تأثیر تعداد توربین‌های گاز بر راندمان اگزرژی و هزینهٔ هر کیلووات ساعت برق تولیدی نیروگاه در حالت بازتوانی با بویلر بازیاب حرارت تک‌فشاره



شکل ٥ بررسی تأثیر تعداد توربین‌های گاز بر راندمان اگزرژی و هزینهٔ هر کیلووات ساعت برق تولیدی نیروگاه در حالت بازتوانی با بویلر بازیاب حرارت دوفشاره



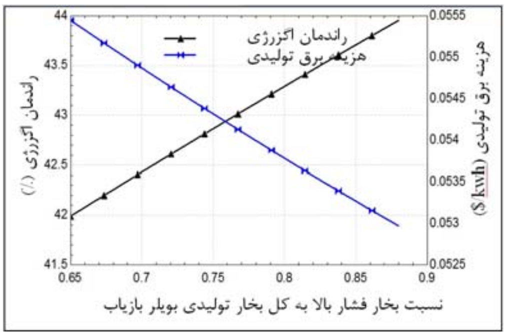
شکل ٦ نمودار تغییرات راندمان اگزرژی و هزینهٔ برق تولیدی نیروگاه بر مبنای تغییرات دبی سوخت داکت برنر در بازتوانی با استفاده از بویلر بازیاب تک‌فشاره.



شکل ٧ نمودار تغییرات راندمان اگزرژی و هزینهٔ برق تولیدی نیروگاه بر مبنای تغییرات دبی سوخت داکت برنر در بازتوانی با استفاده از بویلر بازیاب دوفشاره.

همان‌گونه که در نمودار شکل (٨) مشاهده می‌شود با افزایش این نسبت، راندمان سیکل بازتوانی بـه دلیـل اثر افزایش توان بخش بخـار نیروگـاه، باعـث افـزایش راندمان نهایی سیکل ترکیبی شده است. رونـد افـزایش این نسبت در جهت کاهش هزینهٔ برق تولیدی نیروگـاه است.

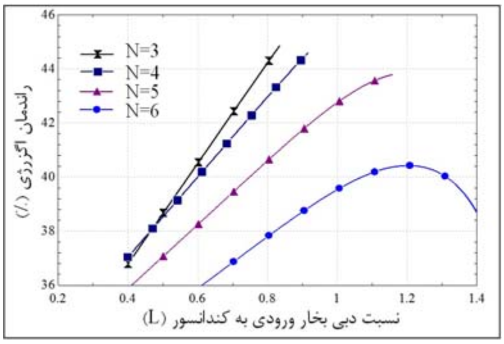
همان‌گونه که قبلاً نیـز بیـان شـد، افـزایش تعـداد توربین‌های گاز در جهت کاهش راندمان کلـی سـیکل بازتوانی است. اما با توجه به نمـودار خروجـی برنامـهٔ مدل‌سازی، افزایش و بالا رفتن دبی کلی بخار خروجی از تـوربین‌هـای بخـار (در محـدودهٔ مجـاز ظرفیـت کندانسور) در یـک محـدوده باعـث افـزایش رانـدمان سیستم و از یک نقطه به بعد در جهت کاهش رانـدمان سیستم خواهد بود (شکل ٩ و ١٠).



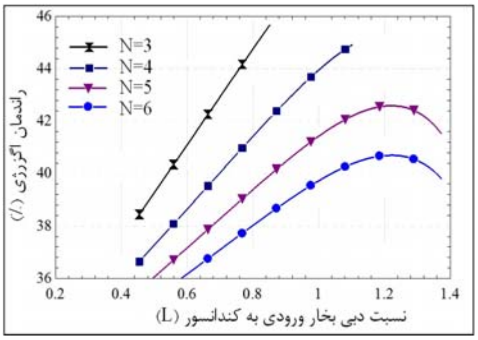
شکل ٨ نمودار تغییرات راندمان اگزرژی و هزینهٔ برق تولیدی نیروگاه بر مبنای تغییرات دبی بخار ورودی به توربین فشار بالا

نمـودار شـکل (۱۱) نشـان‌دهنـدهٔ تـأثیر تغییـرات اخـتلاف دمـای پیـنچ بـر رانـدمان اگـزرژی نیروگـاه بازتوانی‌شده با سه توربین گاز می‌باشد. در این نمـودار دیده می‌شود که افزایش اختلاف دمای پینچ بـرای هـر اواپراتور موجب کـاهش رانـدمان کلـی نیروگـاه شـده است. در واقع افزایش دمـای پیـنچ بـه معنـای کـاهش جذب حرارت گاز توسط آب تغذیه و درنتیجه اتلافات حرارتی بیشتر از طریق دودکش نیروگاه می‌باشد و این دلیـل مسـتدل بـرای رویـهٔ ارائـه‌شـده در شـکل (۱۱) می‌باشد. با استفاده از توربین گاز بیشتر، بـدون اعمـال تغییراتی در دبی آب تغذیه و دما و فشار بخار خروجی از بـویلر بازیـاب حـرارت، رانـدمان نیروگـاه بـه‌طـور محسوسی کاهش می‌یابد. افت پله‌ای راندمان در شـکل (۱۲) به‌دلیل افزایش تعداد توربین‌های گـاز مـی‌باشـد. هم‌چنین اولین تصادف پینچ در بویلر بازیـاب حـرارت مربوط به اواپراتور خط فشار بالا می‌باشد. اهمیت ایـن بخش به‌دلیل تأثیر آن بر سایر پینچ‌ها در بـویلر بازیـاب حرارت می‌باشد.

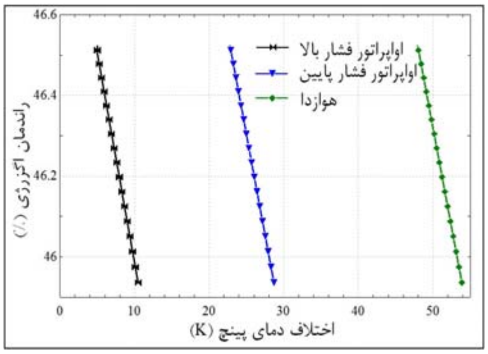
در این نمودار دیده می‌شود کـه در تمـام حـالات بازتوانی با تعداد توربین گاز متفاوت، افزایش اخـتلاف دمای پینچ اواپراتور فشار بالا، کاهش راندمان اگـزرژی سیستم را در پی دارد.



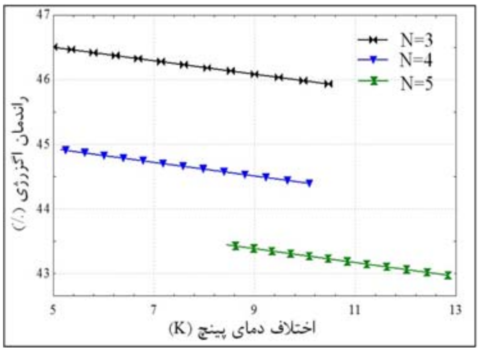
شکل ۹ بررسی اثر تغییرات نسبت دبی بخار ورودی به کندانسور (L) بر راندمان اگزرژی نیروگاه بازتوانی‌شده با بویلر تک‌فشاره، در تعداد توربین‌های گاز متفاوت



شکل ۱۰ بررسی اثر تغییرات نسبت دبی بخار ورودی به کندانسور (L) بر راندمان اگزرژی نیروگاه بازتوانی‌شده با بویلر دوفشاره، در تعداد توربین‌های گاز متفاوت



شکل ۱۱ بررسی اثر تغییرات اختلاف دمای پینچ بر راندمان اگزرژی نیروگاه بازتوانی‌شده با سه توربین گاز



شکل ۱۲ بررسی اثر اخلاف دمای پینچ تبخیرکنندهٔ فشار بالا بر راندمان اگزرژی نیروگاه بازتوانی‌شده در تعداد توربین گاز متفاوت

نتایج بهینه‌سازی

نتایج بهینه‌سازی با در نظر گرفتن چهار سناریوی مختلف و با توجه به تعداد توربین‌های گاز متناسب با توان هر بخش انجام شده است. نتایج بهینه‌سازی دوهدفه در نمودارهای شکل‌های (۱۴ و ۱۳) نشان داده شده است. با اضافه شدن توربین‌های گاز در سیکل بازتوانی اثر راندمان این سیستم‌ها بر راندمان کلی سیکل تاثیر گذاشته است و میانگین راندمان به‌دست آمده در طی فرآیند بهینه‌یابی با افزایش تعداد توربین‌های گازی در حال کاهش و هم‌چنین هزینهٔ تمام شدهٔ برق تولیدی نیز روندی صعودی دارد.

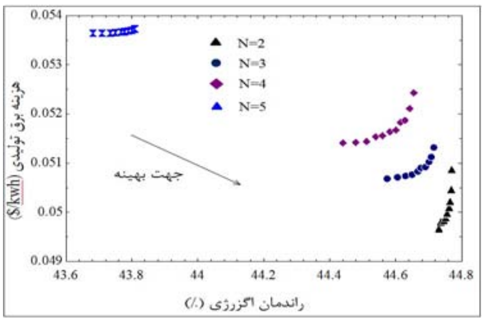
اساس کار و تولید این منحنی بدین گونه است که برای هر نقطه هزینهٔ حداکثر را مشخص کرده و فرآیند بهینه‌سازی حداکثر راندمان اگزرژی را در این نقطه جستجو می‌نماید. در این جستجو راندمان اگزرژی با محدودیت هزینه به‌عنوان تابع هدف جهت به حداکثر رساندن انتخاب شده و با تغییر پارامترهای مستقل ارائه‌شده در جدول (۱) (در محدوده تغییرات مشخص‌شده)، مقدار حداکثر راندمان اگزرژی تعیین می‌گردد.

هدف از بهینه‌سازی دوهدفه در تحقیق حاضر، یافتن نقطه‌ای است که در آن سیستم با صرف حداقل هزینهٔ برق تولیدی، حداکثر راندمان اگزرژی را به خود اختصاص دهد. مختصات این نقطه که با عنوان نقطهٔ تعادل مشخص شده است، معرف هم‌زمان حداقل هزینهٔ برق تولیدی و حداکثر راندمان اگزرژی می‌باشد. اگرچه این نقطه یک حالت ایده‌آل است و دست‌یابی به آن امکان‌پذیر نمی‌باشد، در این‌جا در حالت‌های بهینه‌سازی انجام شده، نزدیک‌ترین نقطه به نقطهٔ تعادل در منحنی پارتو، به‌عنوان نقطهٔ بهینهٔ فنی و اقتصادی سیستم در نظر گرفته شده است.

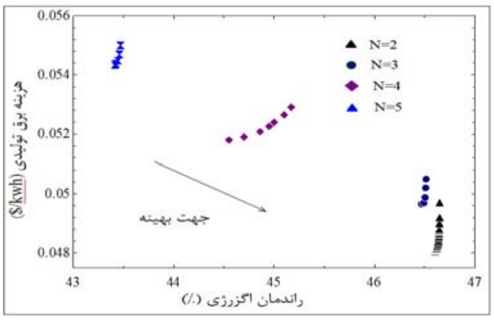
شکل (۱۴) نمونه‌ای از انتخاب این نقطه می‌باشد که در سایر حالات نیز چنین رویه‌ای به‌کار گرفته می‌شود. روش تعیین نقطه بهینه فنی و اقتصادی براساس پژوهش صیادی و مهرابی‌پور [17] انتخاب شده است که حالتی بهینه از راندمان اگزرژی و زمان بازگشت سرمایه را برای یک سیکل گازی بررسی نموده‌اند [17]. در نهایت خصوصیات نقاط بهینهٔ فنی و اقتصادی سیستم در جدول (۲) به تفکیک حالت‌های مورد نظر بیان شده است.

با در نظر گرفتن این خصوصیات به‌ترتیب حالت‌های بازتوانی با دو، سه، چهار و پنج توربین گاز در بازتوانی سیکل مزیت نسبی خواهند داشت. رنج بهینه‌یابی شده برای هر کدام از حالت‌ها و نسبت این رنج‌ها در مقایسه با سایر حالت‌های بررسی شده در نمودار شکل‌های (۱۴ و ۱۳) بیان شده است.

استفاده از بویلر بازیاب حرارت تک‌فشاره در بازتوانی نیروگاه مطابقت بیشتری با سیکل اصلی دارد (شکل ۱ و ۳) ولی همان‌گونه که در داده‌های جدول (۲) دیده می‌شود، محدودیت اختلاف دمای پینچ در تبخیرکنندهٔ فشار بالا (حداقل مقدار پینچ برابر ۵ درجه کلوین [18]) مانع از افزایش بخار ورودی به بویلر بازیاب (L) و درنتیجه موجب تولید بخار کمتر، کاهش توان و افزایش هزینهٔ برق تولیدی می‌گردد.



شکل ۱۳ نمودار پارتو برای ۲، ۳، ٤ و ۵ توربین‌های گاز در حالت استفاده از بویلر بازیاب حرارت تک‌فشاره



شکل ۱٤ نمودار پارتو برای ۲، ۳، ٤ و ۵ توربین‌های گاز در حالت استفاده از بویلر بازیاب حرارت دوفشاره

جدول ۲ مشخصات فنی و اقتصادی سیستم در نقاط بهینه

نام متغیر	واحد	بازتوانی با بویلر بازیاب حرارت تک‌فشاره					بازتوانی با بویلر بازیاب حرارت دوفشاره			
		۲ توربین	۳ توربین	٤ توربین	۵ توربین		۲ توربین	۳ توربین	٤ توربین	۵ توربین
دبی سوخت	Kg/sec	۱/۹۹۱	۱/۵۲۸	۰/۰٦٤	۰		۱/٦۸۸	۱/۲٤	۰/۷۲۸۳	۰
L	---	۰/٦۰۱٦	۰/۷۵۵۸	۰/۹۲۰۱	۱/۱٦٦		۰/۷٤۷۷	۱/۰۷۵	۱/۱۱۲	۱/۲۱۸
اختلاف دمای پینچ در اکونومایزر فشار بالا	K	۵/۰٤۲	۵/۰۲	۵/۰۲۸	۵/۰۱۳		۵/۰۱۵	۵/۰۰	۵/۱۷۹	۸/٤۵
اختلاف دمای پینچ در اکونومایزر فشار پایین	K	---	---	---	---		۲۹/۳۹	۲۲/۹۷	۸۰/۲۱	۱۰۲/٤
اختلاف دمای پینچ در هوازدا	K	---	---	---	---		۳۹/۰۳	٤۸/۱٤	۱۱٤/۲	۱٤٦/٤
Y	---	---	---	---	---		۰/۷٤۷	۰/٦۹٦٦	۰/۸٤۵۷	۰/۸۸
راندمان	%	٤٤/٦۸٤	٤٤/٦۹۱۱	٤٤/٦۲۲	٤۳/۷۷٤٦		٤٦/٦۳	٤٦/۵۰٤	٤٤/۹۱	٤۵/٤٤۷۵
هزینه برق تولیدی	$/kWh	۰/۰۵۰۸۹	۰/۰۵۰۹۲	۰/۰۵۱۸۱	۰/۰۵۳٦٦		۰/۰٤۸۳	۰/۰٤۹۷۷	۰/۰۵۲۱۳	۰/۰۵٤٤۹
توان کل سیکل	MW	۵۰٤/۱	۷۱۰/۳	۹۱٦/۹	۱۱۲۲		۵۱۷/۵	۷٤۳/٤	۹۳٦/۲	۱۱۱۲
انهدام اگزرژی نیروگاه	MW	٦۲٤/۷	۸۸۲/۵	۱۱٤۲	۱٤٤٦		۵۹٤/۵	۸۵۸/۲	۱۱۵۵	۱٤۵۸
نرخ حرارت کل	kJ/kW.h	۷۸۰۲	۷۷۱۰	۷۸۲۰	۷۹۷۱		۷٤۸۹	۷۵۱۰	۷۷۷۵	۸۰۳۸
دمای دود خروجی از بویلر بازیاب حرارت	K	٤۷۳	٤۹۸/۵	۵۰۹/٦	۵۰۷/۹		۳۹۳/۱	۳۹۳/۵	٤۷۰	۵۰۲

همان‌گونه که قبلاً نیز بیان گردید با افزایش تعداد توربین‌های گاز در خصوصیات مطلوب فنی و اقتصادی سیکل بازتوانی کاهش می‌یابد. چنین روندی در نمودار شکل‌های (۱٤ و ۱۳) نشان داده شده است.

جدول (۲) نشان می‌دهد که استفاده از هر بویلر در شرایط مختلف نتایج متفاوتی از شرایط فنی و اقتصادی نیروگاه بازتوانی ارائه می‌دهد. به‌طور کلی در تعداد توربین‌های کم (۲ و ۳ توربین گاز)، بهترین حالت فنی و اقتصادی (حداقل هزینهٔ برق تولیدی و حداکثر راندمان اگزرژی) مربوط به استفاده از بویلر بازیاب دوفشاره می‌باشد.

به‌طور کلی میانگین هزینهٔ تولید برق با سوخت یارانه‌ای و غیریارانه‌ای به‌ترتیب برابر ٤/۸۹ و ۱۰/۷۸ سنت به‌ازای هرکیلووات ساعت برق تولیدی محاسبه شده است [٤]. با فرض ۳۰ درصد هزینه‌های جانبی مانند هزینهٔ توزیع و...، هزینهٔ تمام‌شدهٔ برق تولیدی در نیروگاه، برابر ۷/۵۵ سنت (۰/۰۷۵۵ دلار) می‌باشد. نتایج ارائه‌شده در جدول (۲) برای هزینهٔ برق تولیدی نیروگاه نشان می‌دهد که تغییر ساختار نیروگاه موجب ایجاد هزینه‌ای کمتر از میانگین هزینه‌ها شده است و این به‌معنای بهبود عملکرد نیروگاه در این حالت می‌باشد. در بخش صنعت نیز به‌دلیل وابستگی این بخش به نیازهای روز کشور در جهت تأمین برق مورد نیاز شبکه، علاوه بر دو پارامتر راندمان اگزرژی و هزینهٔ برق تولیدی، پارامتر توان تولیدی نیروگاه نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. از این‌رو نتایج جدول (۲) امکان انتخاب سیکل مورد نظر توسط پیمانکاران و صاحبان صنایع تولیدی برق را فراهم می‌نماید.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست آمده اعمال بازتوانی کامل (با استفاده از تجهیزات متداول در احداث نیروگاه‌های سیکل ترکیبی در ایران)، قابلیت ارتقای راندمان اگزرژی نیروگاه بندرعباس را تا بیش از ٤٦٪ فراهم می‌نماید. با توجه به سناریوهای ارائه شده، صرف‌نظر از میزان توان تولیدی، خصوصیات مطلوب سیکل بازتوانی (ارتقای راندمان و کاهش هزینهٔ برق تولیدی) با استفاده از دو عدد توربین گاز بیشتر از سه توربین گاز می‌باشد و این روند با افزایش تعداد توربین‌های گاز ادامه می‌یابد. در نهایت به‌نظر می‌رسد که با اجرایی شدن قانون هدفمندسازی یارانه‌ها و لزوم ارتقای

رانـــدمان نیروگـــاه‌هـــای حرارتـــی، اســـتفاده از چنـــین روش‌هایی در بالا بردن کیفیت تولید برق در کشـور از موارد ضروری خواهد بود، که انتخاب روش بـازتوانی مناسب بر پایهٔ توجه به میزان اهمیت سه تـابع رانـدمان اگزرژی، هزینهٔ برق تولیدی و تـوان خـالص نیروگـاه، صورت می‌گیرد. اگرچه اسـتفاده از بویلرهـای بازیـاب تک‌فشاره در بازتوانی نیروگاه نسبت به سـیکل مرجـع افزایش راندمان و کاهش هزینهٔ برق تولیدی نیروگاه را درپی خواهد داشت، ولـی بـه‌دلیـل دارا بـودن شـرایط فنی-اقتصادی بهینه و هم‌چنین توان تولیدی مناسب در بـازتوانی بـا اسـتفاده از بویلرهـای بازیـاب دوفشـاره، به‌کارگیری این نوع از بویلرها در بازتوانی نیروگاه بخار بندرعباس پیشنهاد می‌گردد.

مراجع

1. Mehrpanahi, A., Hossienalipour, S.M. and Mobini, k., "Investigation of the effects of repowering options on electricity generation cost on Iran steam power plants", *International Journal of Sustainable Energy*, Vol. 32, No. 4, pp. 229-243, (2013).
2. Rackley, S., "Carbon Capture and Storage", Gulf Professional Publishing, (2009).
3. Brander, J.A. and Chase, D.L. "Repowering Application Considerations", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 114, pp. 643-652, (1992).

٤. ترازنامه انرژی ایران، شرکت توانیر، ١٣٨٩.

5. Dincer, I. and Rosen, M.A., "Exergy, Energy, Environment and Sustainable Development", Elsevier, 1st Edition, June (2007).
6. Bilgen, S. and Kaygusuz, K., "Second Law (Exergy) Analysis of Cogeneration System", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 30, No. 13, pp. 1267-1280, (2008).
7. Bejan, A., Tsatsaronis, G. and Moran, M., "*Thermal design and optimization*", New Yourk: John wiley & Sons, (1996).
8. Balli, O., Aras, H. and Hepbasli, A., "Exergetic performance evaluation of a combined heat and power (CHP) system in Turkey", *International Journal of energy research*, Vol. 31, pp. 849–866, (2007).
9. Szargut, J., Morris, D.R. and Steward, F.R., "*Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes*", New York: Hemisphere, (1988).
10. Aljundi, I., "Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 324-328, (2009).
11. Dincer, I. and Cengel, Y.A., "Energy, entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering", *Entropy*, Vol. 3, pp. 116-149, (2001).

١٢. حسینعلی‌پور، سید مصطفی، مهرپناهی، عبدالله و مبینی، کامران، "بررسی اثر انجام بازتوانی کامل بر ارتقاء خصوصیات فنی-اقتصادی یک نیروگاه بخار"، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره ١١، شماره ١، صص. ١-١٨، (١٣٩٠).

13. Ahmadi, P. and Dincer, i., "Exergoenvironmental analysis and optimization of a cogeneration plant system using Multimodal Genetic Algorithm (MGA)", *Energy*, Vol. 35, pp. 5161-5172, (2010).

١٤. حسینعلی‌پور، سید مصطفی و مهرپناهی، عبدالله، "بررسی اقتصادی بازتوانی نیروگاه‌های بخار در مقایسه با احداث نیروگاه‌های گازی"، نشریه انرژی ایران، دوره ١٢، شماره ٤، صص. ٤١-٦٢، (١٣٨٨).

15. Dixon, S.I., "*Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery*", 4^{TH} Edition, pergamon press, (1998).
16. Escosa, J.M. and Romeo, L.M. "Optimizing CO_2 avoided cost by means of repowering", *Applied Energy*, Vol. 86, pp. 2351–2358, (2009).
17. Sayyaadi, H. and Mehrabipour, R., "Efficiency enhancement of a gas turbine cycle using an optimized tubular recuperative heat exchanger", *Energy*, Vol. 38, pp. 362-375, (2012).
18. Godoy, E., Benz, S.J. and Scenna, N.J., "A strategy for the economic optimization of combined cycle gas turbine power plants by taking advantage of useful thermodynamic relationships", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, pp. 852-871, (2011).